

9. Zane L., Bargelloni L., Patarnello T. (2002) Strategies for microsatellite isolation: a review. *Molecular Ecology* 11: 1-16.

Mgr Przemysław Tomczyk, Uniwersytet Łódzki, Katedra Geobotaniki i Ekologii Roślin, Pracownia Ekologii i Adaptacji Roślin, Łódź.
E-mail: przemyslaw.tomczyk@biol.uni.lodz.pl

CZĘŚCI ZAMIENNE DLA LUDZKICH ZMYŚLÓW. IMPLANTY ŚLIMAKOWE

Ryszard Tadeusiewicz (Kraków)

Streszczenie

W artykule zasygnalizowany został problem sprzęgania fragmentów systemu nerwowego z urządzeniami technicznymi przez tak zwany Brain-Computer Interface (BCI). Ogólna tematyka BCI jest bardzo ciekawa, ale raczej przyszłościowa i w dużej mierze hipotetyczna, więc w tym artykule będzie tylko zasygnalizowana. Natomiast w artykule dokładniej omówiono urządzenie, które od lat wykorzystuje połączenie systemu technicznego z mózgiem. Jest to tak zwany implant ślimakowy, będący protezą narządu słuchu przyłączoną do nerwu słuchowego. W artykule przedstawiono jego budowę i zasadę działania.

Abstract

The article indicates the problem of coupling fragments of the nervous system with technical devices by the so-called Brain-Computer Interface (BCI). The general topic of BCI is very interesting, but rather forward-looking and largely hypothetical, so in this article will only be signaled. Instead of general discussion the article discusses more detail one interesting example: the device that has been using the connection between the technical system and the brain for years. This is the so-called cochlear implant, which is a prosthesis of the auditory organ connected to the auditory nerve. The article presents its structure and principle of operation.

Wprowadzenie

Rozwój techniki medycznej powoduje, że coraz częściej ośmielamy się zastępować naturalne organy człowieka ich odpowiednikami wykonanymi jako twory techniki. W ten sposób moglibyśmy organy niepoprawnie rozwinięte w życiu płodowym (wady wrodzone) lub uszkodzone w następstwie wypadku albo choroby zastąpić elementami sztucznymi. Jak w samochodzie – gdy się coś zepsuje, wystarczy użyć części zamiennej. Mamy takie części zamienne. Operacje ortopedyczne, w których zerwane ścięgna zastępuje się włóknami sztucznymi to już rutyna. Sprężyste stenty rozpierające zwężone przez sklerozę naczynia krwionośne to także często używane elementy techniczne, służące do naprawiania niedoskonałości ludzkiego ciała.

Robimy to coraz śmielej. Wymieniamy zużyte stawy biodrowe na tytanowe implanty, wszywamy sztuczne zastawki serca, używamy pomp insuliny zastępujących funkcjonowanie trzustki u diabe-

tyków i elektronicznych rozruszników serca. Budujemy też sztuczne narządy. Powszechnie używane są sztuczne nerki, ratujące życie ludzi z niewydolnością ich własnych nerek, dostępne jest sztuczne płuco-serce, używane przy zabiegach kardiochirurgicznych, gdy własne serce pacjenta jest zatrzymane albo wręcz wyjęte z klatki piersiowej (na przykład podczas przeszczepu). Wprawdzie sztuczne serce czy sztuczna nerka, które można by było umieścić w ciele pacjenta w miejsce jego własnych narządów, to dopiero przyszłość, bo obecnie budowane sztuczne narządy mają rozmiar sporej szafki i to raczej pacjent jest przyłączany do sztucznego narządu, a nie odwrotnie, ale postęp techniki już nieraz pokazał, do jak daleko idącej miniaturyzacji jesteśmy zdolni.

Jest jednak fragment naszego ciała, do którego podchodzimy z najdalej posuniętą ostrożnością. To mózg – siedlisko myśli, ośrodek uczuć, narzędzie inteligencji, opakowanie osobowości. O sztucznym mózgu możemy chwilowo tylko pomarzyć – zresztą, gdyby człowiekowi wymienić mózg na sztuczną

protezę, to raczej nie byłby to człowiek ze sztucznym mózgiem, a raczej robot wyposażony w ciało człowieka. Niemniej o komunikacji między mózgiem człowieka a urządzeniami sztucznymi myśli się od dawna, bo jest to po prostu potrzebne. Widząc, ile pracy potrzebne jest, aby przenieść nasze myśli do komputera i dalej, na przykład do Internetu – marzymy o tym, żeby nasze myśli mogły się tam przedostawać bez pośrednictwa palców biegnących na klawiaturze czy myszki wskazującej obiekty na ekranie. I jak dobrze byłoby zamiast używać Google – znajdować potrzebne informacje w Internecie w równie naturalny sposób, jak znajdujemy je we własnej pamięci. Do tego potrzebne są urządzenia nazywane **Brain-Computer Interface** (interfejs między mózgiem i komputerem) [3]. Próbuje je budować na różne sposoby [2]. W tym artykule opiszę jeden z tych sposobów. Sposób ten stosuje narzędzie, które może wprowadzać informacje o dźwiękach wprost do mózgu całkowicie głuchego człowieka. Narzędzie to nazywa się „implant ślimakowy” i jest w Polsce wszczepiane przez profesora **Henryka Skarżyńskiego** w Międzynarodowym Centrum Słuchu i Mowy Instytutu Fizjologii i Patologii Słuchu w Kajetanach pod Warszawą [4]. Wszczepiono tam już ponad 2000 takich implantów. Mam z tym Instytutem bardzo bliskie naukowe kontakty, w wyniku czego w holu tego Instytutu wisi tablica (Ryc. 1), której fragment (Ryc. 2) jest przedmiotem mojej osobistej dumy.



Ryc. 2. Powiększony fragment tablicy z ryciny 1.

Spróbuję teraz opisać, jak jest zbudowany i jak działa implant ślimakowy – urządzenie, które od lat u wielu ludzi skutecznie sprzęga urządzenie elektroniczne z mózgiem.

Implant ślimakowy – ogólna zasada działania

Ogólna budowa implantu ślimakowego pokazana jest na rycinie 3.



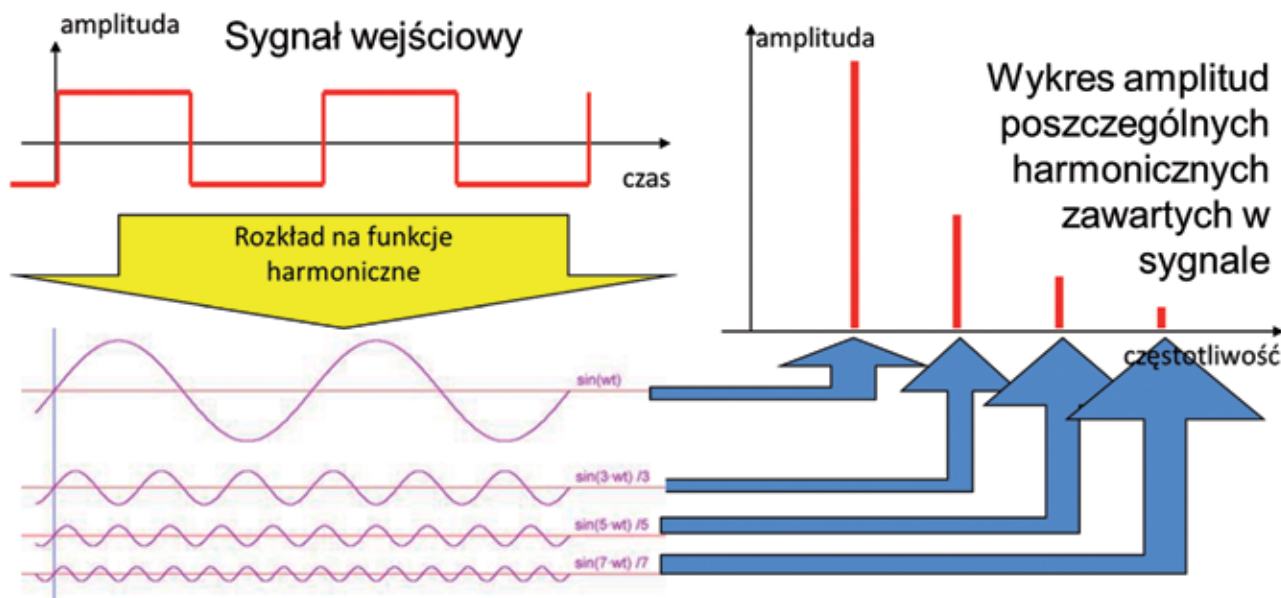
Ryc. 1. Tablica „Przyjaciół po wsze czasy” w Międzynarodowym Centrum Słuchu i Mowy.



Ryc. 3. Ogólna budowa implantu ślimakowego. Schemat opracowany przez autora z wykorzystaniem rysunku z Wikipedii (domena publiczna) umieszczonego pod adresem https://pl.wikipedia.org/wiki/Implant_ślیمakowy#/media/File:Cochlear_implant.jpg

Zasada jego działania jest następująca:

Dźwięki, które pacjent powinien usłyszeć, są rejestrowane przez **mikrofon**. Żeby skutecznie przekazać je do mózgu pacjenta są one elektronicznie przetwarzane w **procesorze mowy** na sygnały opisujące przebieg sygnału dźwiękowego w poszczególnych pasmach częstotliwości. Jest to konieczne, ponieważ w uchu wewnętrznym człowieka ma miejsce zamiana sygnału dźwiękowego, traktowanego jako przebieg zmiennego w czasie ciśnienia akustycznego – na informacje o tym, jaki jest udział w tym sygnale



Ryc. 4. Zamiana sygnału wejściowego zależnego od czasu na wykres pokazujący amplitudy funkcji poszczególnych harmonicznych, na które rozłożono sygnał. Mózg rozpoznaje dźwięki właśnie dzięki ustalaniu w uchu wewnętrznym amplitudy poszczególnych składowych harmonicznych.

składowych o różnych częstotliwościach (dźwięków elementarnych o różnej wysokości). Zasada podziału sygnału na składowe o różnych częstotliwościach pokazana została na rycinie 4. W uchu tego podziału dokonuje tak zwana błona podstawna w narządzie

Cortiego, natomiast w procesorze mowy separacji dokonują specjalne filtry, omówione w następnym rozdziale.

Wracając do schematu przedstawionego na rycinie 3, sygnał dźwiękowy w postaci informacji o amplitudzie harmonicznych w poszczególnych pasmach częstotliwości (wypracowanej w procesorze mowy) jest następnie wysyłany do wnętrza głowy pacjenta przez **cewkę nadawczą**.

Wewnątrz głowy znajduje się – umieszczona tam przy pomocy zabiegu operacyjnego – **cewka odbiorcza**. Dzięki elektromagnetycznemu sprzężeniu z cewką nadawczą w cewce tej rejestrowane są sygnały, zawierające elektronicznie przetworzone informacje o zawartości składowych o różnych częstotliwościach w odbieranym przez mikrofon dźwięku.

Cewka nadawcza nie szpeci pacjenta, co można zobaczyć na rycinie 5.

Warto zwrócić uwagę na jeden ważny szczegół: przy wszystkich systemach, w których trzeba połączyć jakieś urządzenie techniczne z jakimś narzędem wewnątrz ciała człowieka – najbardziej krytyczne jest miejsce, w którym element łączący (kabel elektryczny, łącznik mechaniczny, dren hydrauliczny) przechodzi przez skórę (nazywaną przez anatomów nie bez racji „powłoką wspólną”). Ta powłoka oddziela wnętrze ciała od środowiska zewnętrznego i jest granicą nienaruszalną. Każda przerwa w tej powłoce

to otwarte wrota dla infekcji, przesączania płynów z wnętrza ciała, wdzierania się różnych substancji do wnętrza. Nie do akceptacji!

W związku z tym od lat wiadomo, że nie udają się żadne zabiegi trwałego przeprowadzenia jakiegokolwiek

elementu technicznego przez skórę, bo w miejscu przejścia powstanie nie gojąca się rana z fatalnymi skutkami.

Jeśli więc chcemy przesłać sygnały zarejestrowane przez **mikrofon** i przetworzone przez **procesor mowy** do dalszych elementów składających się na implant ślimakowy, umieszczonych z konieczności wewnątrz ciała człowieka (i to nie byle gdzie – w głowie!) – to do przesłania trzeba użyć pola elektromagnetyczne-



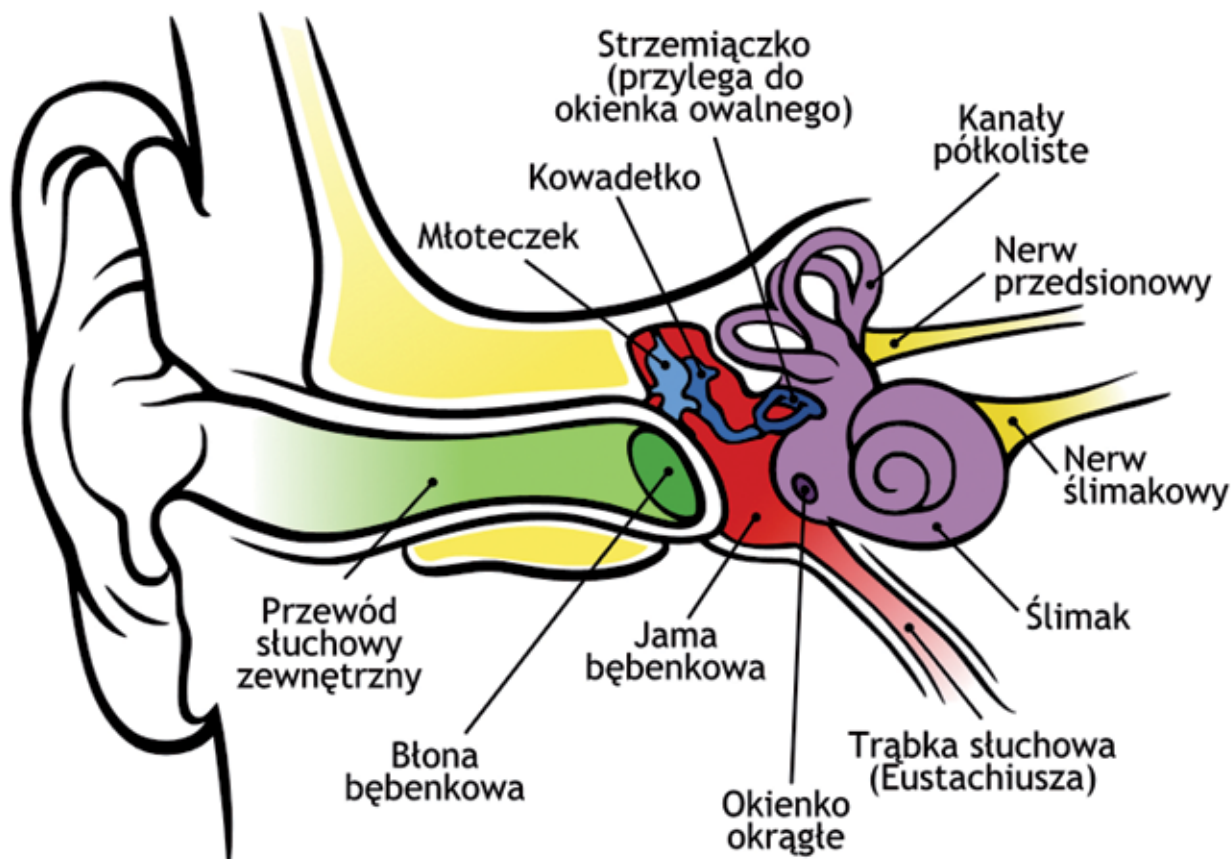
Ryc. 5. Zewnętrzne składniki systemu implantu ślimakowego. Mało widoczny za uchem procesor mowy oraz przypięta do włosów cewka nadawcza. Źródło public domain: I, Ydomusch, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2386884>

go. Ono swobodnie wnika do wnętrza ciała człowieka i jest (przy małych natężeniach) całkowicie nieszkodliwe. Owo pole rozpięte między **cewką nadawczą** a **cewką odbiorczą** przesyła do wnętrza ciała człowieka sygnały wytworzone w **procesorze mowy**.

Sygnały te służą następnie do wytworzenia w **stymulatorze** (wszczepionym do wnętrza czaszki) impulsów elektrycznych, które przez **izolowany kabel wielożyłowy** przekazywane są do ucha wewnętrznego.

Kabel jest wielożyłowy, ponieważ działanie implantu polega na tym, że stymulowane jest przez wiele **elektrod** wiele punktów **ślimaka**, stanowiącego zasadniczą część ucha wewnętrznego (Ryc. 6). To tu odbierane są i rozróżniane tony muzyczne o różnej wysokości i poszczególne składowe (o różnych częstotliwościach) składające się na dźwięki mowy.

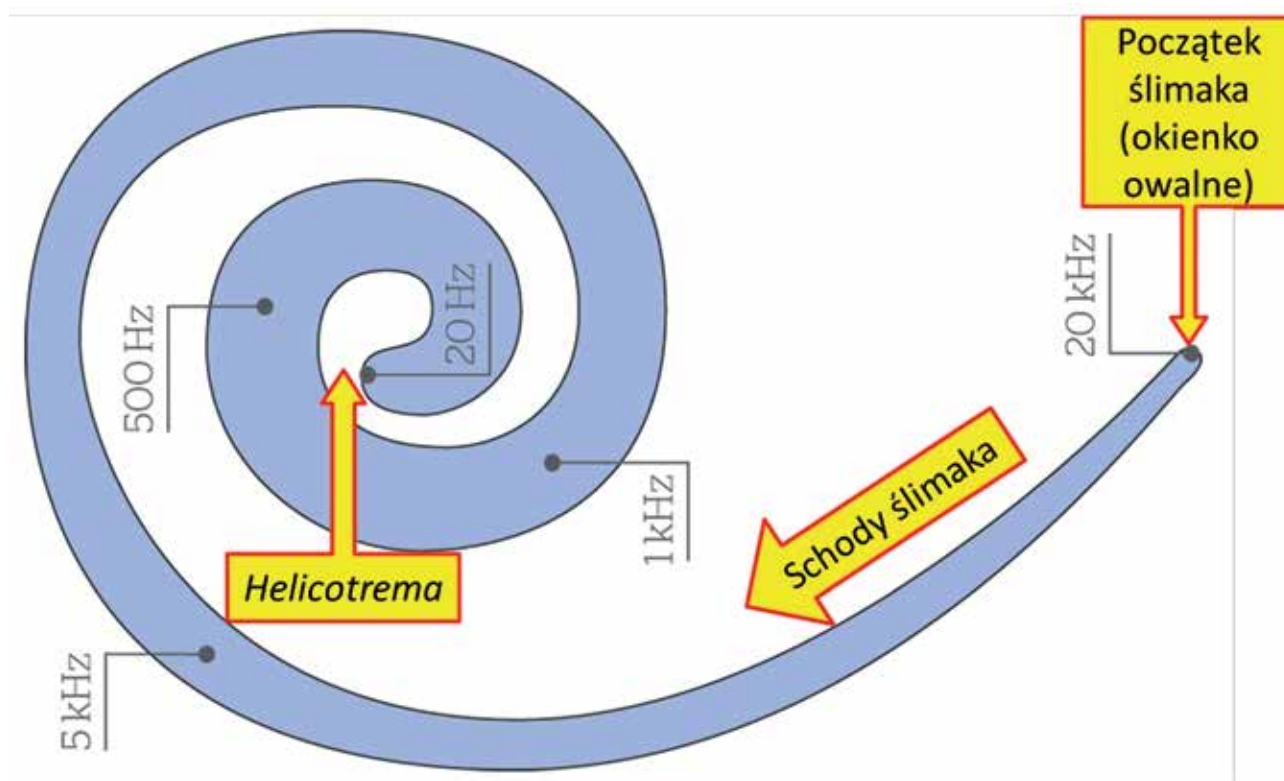
Warto wiedzieć, że w normalnym zdrowym ślimaku położenie punktu, w którym receptory dźwięku (tak zwane komórki rzęsaty) wysyłają swoje sygnały do neuronów tworzących nerw słuchowy, zależy od częstotliwości poszczególnych składowych słyszanego dźwięku. Odkrył to Georg Von Bekesy i nazwał „zasadą miejsca” (za co dostał Nagrodę Nobla w 1961 roku). Z „zasady miejsca” wynika, że składowe dźwięku o wysokich częstotliwościach są sygnalizowane w dolnej części ślimaka. Tuż przy jego wej-



Ryc. 6. Schemat budowy ucha ze wskazaniem ślimaka. Źródło public domain: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/98/Anatomy_of_the_Human_Ear_pl.svg

ściu, w tak zwanym okienku owalnym, rejestrowane są najwyższe słyszalne dźwięki, o częstotliwości 20.000 Hz). Składowe dźwięku o częstotliwościach coraz niższych są sygnalizowane w dalszych częściach kanału ślimaka, który układa się w formie wspinającej się w górę spirali, mającej łącznie 2,5 zвитki. Ze względu na charakterystyczny kształt, przypominający spiralną klatkę schodową, kanały ślimaka (są łącznie trzy) nazywane są schodami przedsionka i schodami bębenka. Najniższe dźwięki (o częstotliwości 20 Hz) odbieramy u samego szczytu tych schodów, w pobliżu tak zwanej *helicotremy*, czyli miejsca, gdzie na końcu schody przedsionka łączą się ze schodami bębenka (Ryc. 7). Szara taśma na rysunku obrazuje swoim kształtem tak zwaną błonę podstawną, która na początku ślimaka jest wąska, cienka i silnie

Gdy stosujemy implant ślimakowy, do kanału ślimaka wprowadza się wiązkę połączonych mechanicznie elektrod, układających się w jego spiralnym biegu. Długość wiązki odpowiada długości schodów ślimaka – od 17 do 26 mm. Wiązka składa się z 8 do 24 elektrod, których aktywne zakończenia są rozmieszczone równomiernie wzdłuż długości wiązki i pobudzają elektrycznie różne części ślimaka. **Elektrody** położone w pobliżu wejścia do ślimaka wysyłają impulsy stymulujące pochodzące z tej części **stymulatora**, którą steruje sygnał z **procesora mowy**, będący miarą składowej dźwięku o wysokich częstotliwościach. Im dalej w głąb ślimaka wsunięta jest elektroda, tym niższa jest częstotliwość dźwięku, który wywołuje jej działanie. Prądy wysyłane przez elektrody stymulują odpowiednie neurony zwoju



Ryc. 7. Ilustracja „zasady miejsca”. W zależności od wysokości dźwięku rejestrują go komórki słuchowe położone w różnych miejscach ślimaka. Im niższy dźwięk, tym dalej w głąb ślimaka.

napięta, więc wprawiają ją w drgania dźwięki o dużej częstotliwości, natomiast w pobliżu *helicotremy* jest szeroka, gruba i wiotka, więc łopocze pobudzana dźwiękami o niskiej częstotliwości. Na błonie podstawnej rozmieszczone są komórki rzęsaty (receptory dźwięku), które pod wpływem drgań błony przesyłają sygnały do komórek zwoju spiralnego – innych dla każdej części ślimaka. W ten sposób miejsce drgania błony „wybiera” jeden z około 30 000 neuronów, a wybrany (zastymulowany) neuron informuje mózg o wysokości dźwięku.

spiralnego, a mózg jest w ten sposób informowany o wysokości dźwięku.

W tym miejscu działanie implantu ślimakowego się kończy i zaczyna się przesyłanie sygnału do mózgu za pomocą elementów nerwowych, składających się na drogę słuchową. Włókna (aksony) neuronów zwoju spiralnego tworzą nerw ślimakowy (część ósmego nerwu czaszkowego), prowadzący informacje o słyszonym dźwięku do mózgu. Oczywiście po drodze informacje te są jeszcze przetwarzane w strukturach części nerwowej drogi słuchowej (w jądrach ślimakowych,

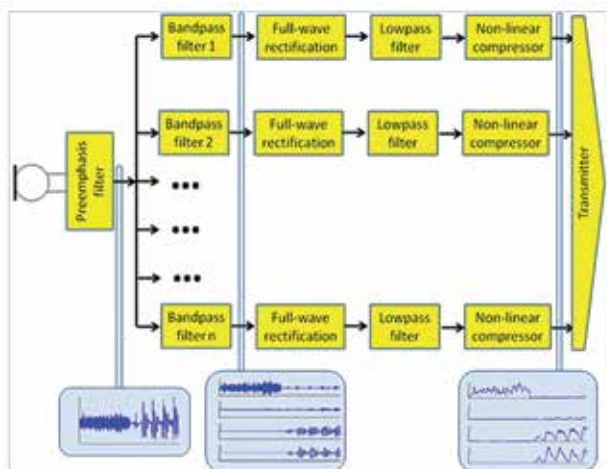
jądrach oliwki górnej, wstędze bocznej i wzgórków dolnym, a potem w jądrze ciała kolankowatego przyśrodkowego) – ale to już jest normalne funkcjonowanie elementów biologicznej struktury analizującej rozważane dźwięki, której tu teraz omawiać nie będziemy.

Kilka szczegółów technicznych i medycznych

Dźwięki, których człowiek głuchy by nie słyszał, a które dotarły do jego mózgu dzięki zastosowaniu implantu ślimakowego, różnią się nieco od tych, które słyszy człowiek z całkowicie zdrowym słuchem. Są one jednak na tyle wyraźne, że po odpowiednim treningu człowiek ten bez najmniejszych ograniczeń może komunikować się z innymi ludźmi za pomocą sygnału mowy, a także jest w stanie słuchać muzyki (w ograniczonym zakresie).

Przedstawię teraz wybrane szczegóły budowy ważniejszych elementów implantu ślimakowego. Wykorzystam przy tym ryciny, które użyłem w moim artykule [5], dlatego opis bloków na schematach będzie w języku angielskim, ale wszystkie użyte opisy będą wyjaśnione w tekście.

Zacniemy od procesora mowy. Jego schemat przedstawia rycina 8.



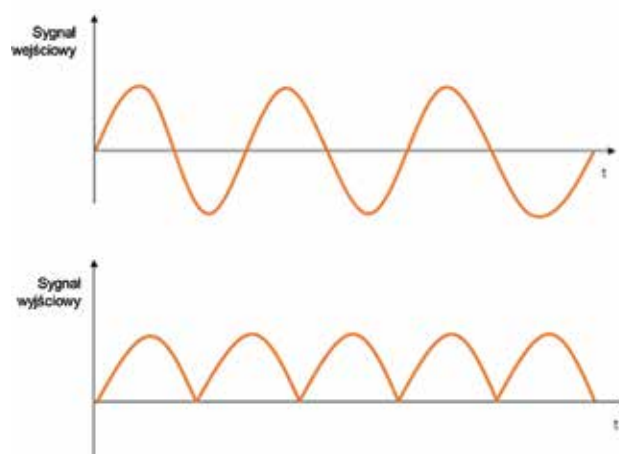
Ryc. 8. Budowa procesora mowy. Rysunek pobrany z pracy autora - pozycja [5].

Idąc od lewej do prawej na początku widzimy symbol mikrofonu (kółko z kreską), którego omawiać nie trzeba, bo jest to urządzenie, które wszyscy znają. Sygnał dźwiękowy zarejestrowany przez mikrofon poddawany jest najpierw procesowi tak zwanej **premfazy** (*Preemphasis filter*). Prefmaza polega na wzmocnieniu wysokoczęstotliwościowej części sygnału, ponieważ energia fali dźwiękowej związanej z sygnałem mowy jest o wiele większa w zakresie niskich częstotliwości, niż w zakresie czę-

stotliwości wysokich, które jednak są także potrzebne do rozumienia tego, co rozmówca do nas mówi. Na dole rysunku na szarym tle pokazany jest przykładowy przebieg czasowy sygnału mowy po preemfazie (niebieski wykres). Widoczne są dwie głoski: wysokoczęstotliwościowa głoska „S” oraz niskoczęstotliwościowa samogłoska „A”. Gdyby nie preemfaza - dysproporcja amplitud tych dwóch głosek byłaby o wiele większa, gdyż samogłoski mają zwykle od 20 dB wyższy poziom głośności niż głoski szumowe. Dzięki preemfazie w sygnale widać zarówno jedną, jak długą głoskę (nazywaną w fonetyce akustycznej „fonemem”).

Następne bloki dzielą sygnał na pasma częstotliwości. Każdy z tych bloków, nazwanych na rysunku *Bandpass filter* (po polsku „filtr pasmowy”) oznaczony odpowiednim numerem, wydziela z sygnału mowy odpowiednio wybrane pasmo częstotliwości. Pasma takie jest ograniczone od dołu i od góry, a granice tych pasm częściowo zachodzą na siebie. Na rycinie 8 u dołu pokazano sygnały na wyjściach czterech przykładowych filtrów pasmowych – w kolejności od góry jest wyjście filtru wycinającego pasmo najwyższych częstotliwości, a kolejno niżej – wyjścia filtrów o coraz niższych częstotliwościach.

Sygnały uzyskane na wyjściach filtrów są następnie formowane w blokach opisanych jako *Full-wave rectification* (po polsku – prostownik dwupołówkowy). Działanie tego prostego urządzenia ilustruje rycina 9.



Ryc. 9. Działanie prostownika dwupołówkowego.

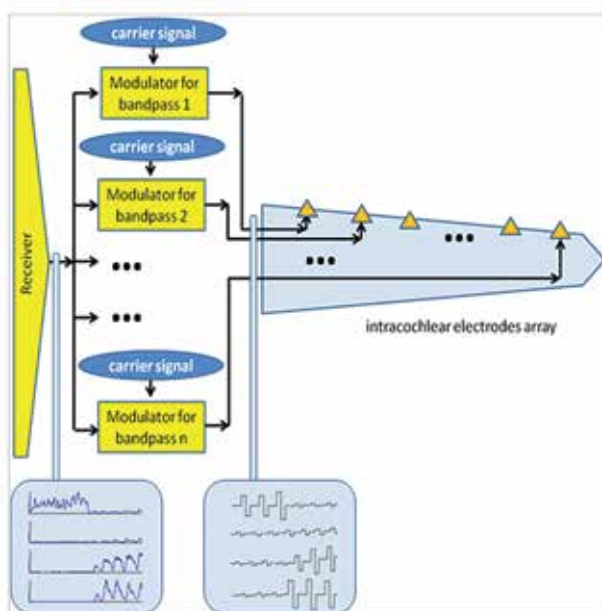
Sygnał wejściowy (pochodzący z filtru pasmowego) przyjmuje wartości na przemian dodatnie i ujemne. Niezależnie od tego, czy energia tego sygnału jest duża, czy mała – wartość średnia wynosi zawsze zero. Tymczasem w dalszych rozważaniach zależy nam na ustaleniu energii sygnału w poszczególnych pasmach, więc proste urządzenie elektroniczne odwraca

ujemne połówki fal – i przebieg ma już tylko wartości dodatnie. Ich wartość średnia (w określonym odcinku czasu) jest dobrą miarą energii tego sygnału. Oczywiście sygnał dźwiękowy stale się zmienia, bo mówiący wypowiada coraz to nowe głoski albo muzyk produkuje coraz to inne tony. Ale są to zmiany dość powolne, odpowiadające częstotliwości dziesiątek herców, podczas gdy sam dźwięk jako taki przenoszony jest przez falę o częstotliwości setek lub tysięcy herców. Dlatego uśrednianiem sygnałów za prostownikami zajmują się bloki opisane na rysunku 8 jako *Lowpass filter* (po polsku – filtr dolnoprzepustowy). W efekcie ich działania wydobyte zostają informacje o tym, jak dźwięk się zmienia, natomiast odfiltrowane zostają szczegóły fali dźwiękowej jako takiej.

Zmienność sygnału dźwiękowego odznacza się bardzo dużą dynamiką (sięgającą 50 dB), podczas gdy zakres amplitud sygnałów elektrycznych pobudzających zakończenia nerwowe w ślimaku to zaledwie 5 dB. Przed wysłaniem do implantu sygnał opisujący dźwięk musi więc zostać „spłaszczony”. Dokonuje tego odpowiedni nieliniowy kompresor (na rysunku 8 opisany jako *Non-linear compressor*). Sygnały po filtracji i kompresji pokazane są, jako niebieskie wykresy na szarym polu, poniżej bloku *Non-linear compressor*.

Takie właśnie sygnały trafiają do nadajnika (na rysunku opisanego jako *Transmitter*) i poprzez cewkę nadawczą wysyłane są do części implantu ulokowanej wewnątrz czaszki pacjenta.

Schemat tej wszczepianej do czaszki części implantu przedstawia rycina 10.



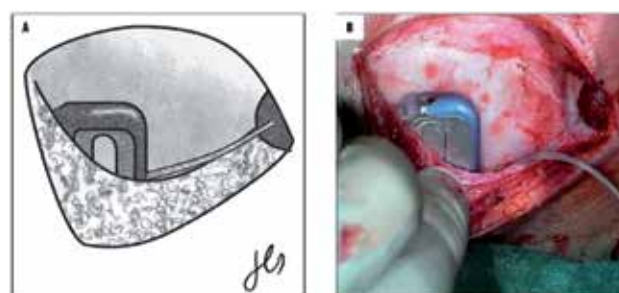
Ryc. 10. Schemat wewnętrznej części implantu ślimakowego. Rysunek pobrany z pracy autora - pozycja [5].

Ta część ma wyraźnie mniej elementów, niż omawiany wyżej procesor mowy. W strukturze na rycinie 10 widać najpierw odbiornik sygnałów (*Receiver*). Wychodzi z niego ten sam sygnał (pokazany na dole), który wysłał nadajnik. Sygnał ten opisuje zmienność dźwięku w poszczególnych pasmach częstotliwości. Informację o zmienności sygnału dźwiękowego wykorzystują modulatory dla poszczególnych pasm częstotliwości (opisane na rycinie 10 jako *Modulator for bandpass* oznaczone odpowiednim numerem). Wytworzą one sygnały stymulujące dla poszczególnych elektrod, wykorzystując do tego celu specjalny sygnał nośny (*carrier signal*), tak dobrany, żeby maksymalnie skutecznie pobudzał zakończenia nerwowe w ślimaku. Modulacja polega na tym, że gdy docierająca z odbiornika informacja wskazuje na dużą energię sygnału w danym paśmie częstotliwości, to modulator wysła do elektrody sygnał nośny o dużej amplitudzie. Jeśli z kolei odbiornik sygnalizuje, że w danym paśmie sygnał dźwiękowy był słaby, to modulator tłumi sygnał nośny aż do jego całkowitego wygaszenia.

Odpowiednio zmodulowane sygnały nośne dostarczane są do poszczególnych elektrod wchodzących w skład wewnątrz-ślimakowej wiązki (*intracochlear electrodes array*) stymulują w opisany wyżej sposób zakończenia nerwowe i inicjują przesyłanie informacji do mózgu.

Na koniec jeszcze tylko dwa szczegóły medyczne:

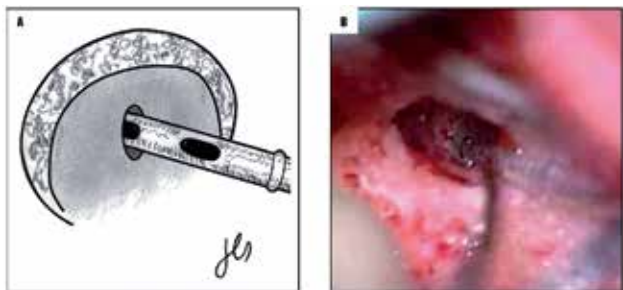
Na rycinie 11 pokazano sposób umieszczania sygnałów i stymulatora w specjalnej niszy wydrążonej w kości skroniowej, a na rysunku 12 – wprowadzanie wiązki elektrod do schodów ślimaka.



Ryc. 11. Umieszczenie odbiornika sygnałów i stymulatora w specjalnej niszy wydrążonej w kości skroniowej. Rysunek i zdjęcie z pola operacyjnego zaczerpnięte z pracy [4] i wykorzystane za zgodą jej autora.

Podsumowanie

Implanty ślimakowe przywróciły możliwość słyszenia tysiącom ludzi na całym świecie. Ponadto dowiodły, że połączenie urządzenia technicznego z systemem nerwowym człowieka jest możliwe. Inny przykład takiego połączenia opisałem w moim wpisie na blogu [6], gdzie wyjaśniam, w jaki sposób kobieta,



Ryc. 12. Wprowadzanie wiązki elektrod do schodów ślimaka. Rysunek i zdjęcie z pola operacyjnego zaczerpnięte z pracy [4] i wykorzystane za zgodą jej autora.

mająca protezę zastępującą utraconą rękę, może odczuwać wrażenia dotykowe związane z kontaktem tej protezy z różnymi przedmiotami. Duże zainteresowanie budziły też doniesienia o próbach przesyłania obrazu z kamer telewizyjnych bezpośrednio do kory wzrokowej niewidomych pacjentów [1], chociaż

konieczność stosowania w tym przypadku metod mocno inwazyjnych (elektrody wklute do kory mózgowej) i konieczność przesyłania do wnętrza głowy ogromnych ilości informacji (obraz z kamery ma o wiele większą objętość informacyjną niż dźwięk z mikrofonu) spowodowały, że postęp w tej dziedzinie jest mniejszy, niż początkowo oczekiwano.

Są też publikacje o mniej czy bardziej udanych próbach wykorzystania różnych metod komunikacji w drugą stronę, to znaczy bezpośredniego odbierania wybranych form aktywności mózgu do sterowania różnych urządzeń technicznych. O niektórych z nich wspominałem we wstępie do tego artykułu, powołując się na publikacje [3] i [2]. Jednak do pełnej realizacji tej metody też jest jeszcze daleko.

Bibliografia:

1. Dobelle W.H. (2000) *Artificial Vision for the Blind by Connecting a Television Camera to the Visual Cortex*. ASAIO Journal, No. 46, pp. 3-9
2. Graimann B., Allison B., Pfurtscheller G. (2011) *Brain-computer Interfaces: Non-invasive and Invasive Technologies*. Springer 2011.
3. Popescu F., Blankertz B., Müller K.R. (2008) *Computational Challenges for Noninvasive Brain Computer Interfaces*. IEEE Intelligent Systems, 23, 78-79.
4. Skarzynski H., Lorens A., Piotrowska A., Skarzynski P.H. (2010) Hearing preservation in partial deafness treatment. *Medical Science Monitor*, 16, 555-562.
5. Tadeusiewicz R., Rotter P. (2012) *From cochlear implants to brain-computer interfaces*. Bio-Algorithms and Med-Systems, Vol. 8, 267-286
6. Tadeusiewicz R. (2018) Wpis na blogu zatytułowany: *Kolejny krok na drodze do bezpośredniej komunikacji między mózgiem człowieka i komputerem*, wpisany 14.01.2018, dostępny pod adresem: <http://ryszardtadeusiewicz.natemat.pl/227367,kolejny-krok-na-drodze-komunikacji-miedzy-mozgiem-i-komputerem>

Prof. zw. dr hab. inż. Ryszard Tadeusiewicz, Pracownik Katedry Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej AGH, Absolwent AGH 1971, informatyk, automatyk, biocybernetyk. W latach 1998–2005 Rektor AGH, a w latach 2010–2015 Prezes Krakowskiego Oddziału PAN. Autor ponad 100 książek, ponad 1000 artykułów naukowych i ponad 700 felietonów popularnonaukowych. Doktor Honoris Causa 12 uczelni krajowych i zagranicznych. Pełne dane: www.Tadeusiewicz.pl